もう一度学ぶ電磁気学の世界

# 第11回 13.56MHz RFIDタグのしくみ

小暮裕明

ボードの記事　ビギナーズ

**前回(2005年4月号，pp.136-144)は，日本でも制度化が進む900MHz帯で期待されるRFIDタグのアンテナについて調べました．ユビキタス社会の到来で欠くことのできないアンテナですが，使用する周波数によって動作原理が異なります．RFIDタグは900MHzのほかに13.56MHz(写真1)がすでに使われていますが，その波長は22mもありますから，半波長ダイポールでは実装できません．そこで登場するのが今回詳しく調べる微小ループ・アンテナです．エレメントの長さは波長に比べて十分小さくてもよいのですが，RFIDタグの寸法ほど小さくなるとさすがに放射効率はきわめて低く，アンテナというよりもコイルの磁気誘導を利用した通信と考えられます．(筆者)**

## 1．微小ループ・アンテナ

### ● 微小ループのシミュレーション

今まで調べてきたアンテナは，ヘルツ・ダイポールの動作原理に基づくもので，給電点から伸びた2エレメントの先は開放端でした(**図1(a)**)．両端の間に形成される電界を広く空間に分布させ，ループ状の電界(電気力線)が押し出されることで電磁波が作られることがわかりました(本誌2004年11月号，pp.139-146の連載第7回を参照)．

**図1(b)**は，ダイポール・アンテナの両エレメントを折り曲げ，先端を短絡した回路とも考えられますが，全長が波長に比べて十分短いものを，微小ループ・アンテナと呼びます．どの程度を微小とみなすかは議論が分かれるところですが，一般的に波長の1/10以下を指すようです．

**図2**は全長220mm(横70mm，縦40mm)の微小ループをSonnet Lite[注1]でシミュレーションしたモデルです．ポートは前回(本誌2005年4月号，pp.136-144の連載第10回)のダイポール・アンテナで使用した内部ポート(internal port)にしています．

13.56MHzではエレメント表面の電流は**図3**のようになり，四隅の先端部を除けば，ほとんど同じ値になっています．ただしこのモデルは，Sonnet Liteのメモリ制限であ

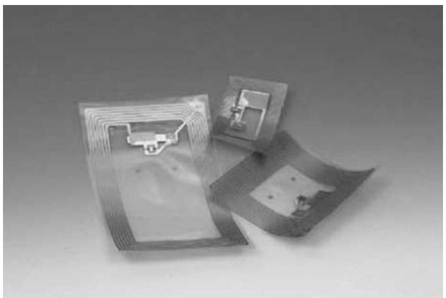


**写真1　13.56MHzタグの例**
米国Texas Instruments社のTag-it．

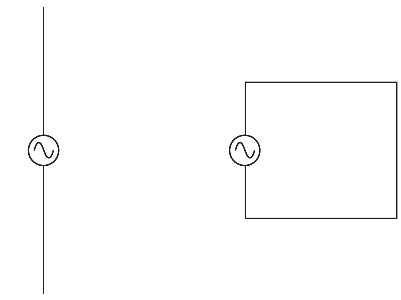



**図1　微小ループ・アンテナ**
**微小ループ・アンテナは，ダイポール・アンテナの両エレメントを折り曲げ，先端をショートさせた回路と考えることができる．**

注1：無償版のSonnet LiteはSonnet技研のWebサイト(http://www.sonnetsoftware.co.jp/)からダウンロードできる．電磁界シミュレーションの使用事例については，参考文献(1)，(2)を参照．

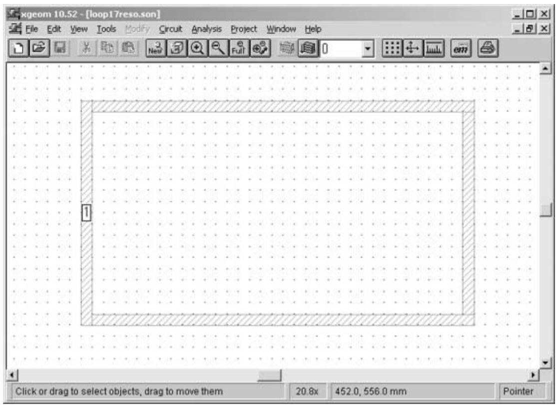


**図2　微小ループ**

**Sonnet Lite のモデル．セル寸法は $x$，$y$ とも 2mm，Box 寸法は 1024mm × 1024mm．Box Top と Bottom を Free Space に設定．誘電体層は上下とも 50mm 厚で比誘電率は 1（空気）のままにしている．**

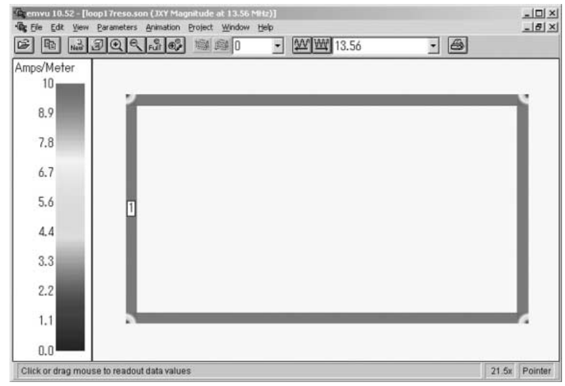



**図3　エレメント表面の電流の解析**

**Sonnet Lite による解析結果．四隅の先端部を除けば，ほとんど同じ値になっている．**

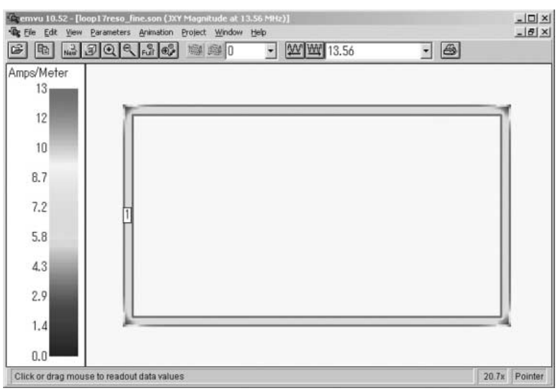



**図4　エレメント表面の電流の詳細解析**

**Sonnet Professional による解析結果．エレメントの縁に沿った強い電流分布が認められる．**

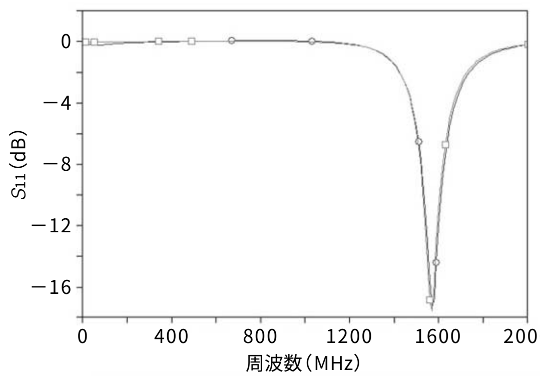



**図5　*S* パラメータの比較**

**セルを細かくしたほうが，より現実に近い結果が得られるが，*S* パラメータで比較した場合，両者の誤差は小さい．**

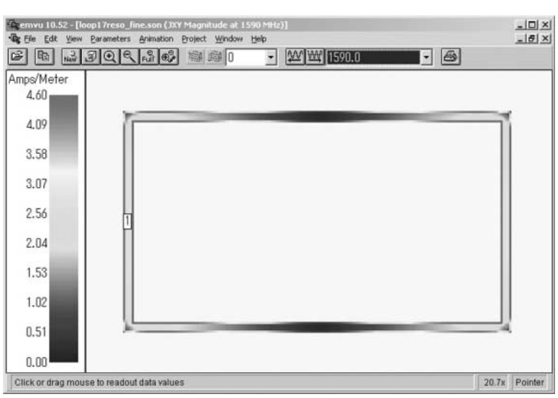



**図6　エレメント表面の電流分布**

**ポート付近と，対向するエレメントの同じ位置で電流値が最大になっている．**

る16Mバイト以内で動くように，2mm幅の粗いセルに設定してあり，エレメントの幅方向を一つのセルで表現しています．制約のないSonnet Professional版で，例えば幅方向を五つのセルで分割すると，**図4**に示すようなエレメントの縁に沿った強い電流分布が認められます．

高周波では線路の縁に電流が偏る現象が見られますから，セルを細かくしたほうが，より現実に近い結果が得られるといえます．しかし，*S* パラメータで比較した場合，両者の誤差は**図5**に示す程度ですから，Sonnet Liteでも十分役に立ちそうです．

**図5**は13.56MHzよりもはるかに高い周波数である2GHzまで，ABSスイープ機能(3)を使って得た広帯域の結果です．$S_{11}$（反射係数）が非常に小さくなる1.6GHz付近では何が起こっているのでしょうか．

**図6**はこの周波数におけるエレメント表面の電流分布で

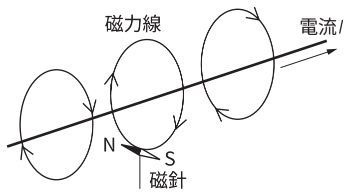



**図7　直線状に流れる電流の周りにできる磁界**
エルステッドが1819年に発見.

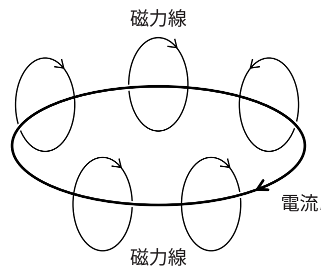



**図8　ループ状の線路に流れる電流と周囲にできる磁界**
アンペアの右ネジの法則.

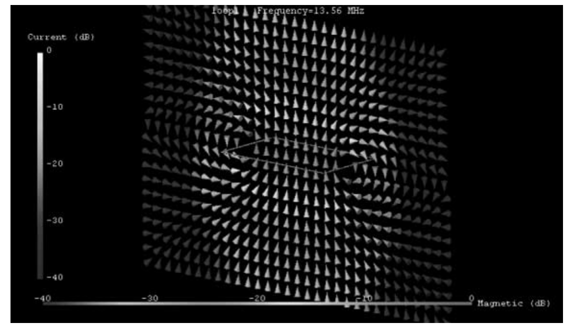



**図9　13.56MHzにおける磁界**
13.56MHzにおけるある瞬間の磁界を表示.

す．ポート付近と，対向するエレメントの同じ位置で電流値が最大になっています．また，水平エレメントの中央部では，逆に電流が小さくなっていることがわかります．つまり左右にそれぞれ半波長の波が乗っているようすがわかり，これはちょうど前回シミュレーションした折り曲げダイポール・アンテナが二つつながっているようにも考えられます．

## ● 微小ループの周りの磁界

**図6**のように全長が1波長に近い場合は，ループに沿って半波長の定在波が二つできる電界型のアンテナと考えられます．これはキュービカル・クワッド(cubical quad)アンテナとも呼ばれ，アマチュア無線家の自作アンテナとしてよく知られています．

さて，**図3**や**図4**は同じモデルの13.56MHzにおける電流分布です．こちらは全長が波長の約1/100にあたり，波長に比べて十分微小なループといえます．したがって，エレメント全体に渡って均一の電流が分布しており，短絡回路なので強い電流が流れています．

エルステッド注2は1819年に，**図7**に示すような直線状に流れる電流の周りにできる磁界を発見しましたが，アンペア注3はこれをさらに発展させ，「磁界の向きに右ネジを回転させると，ネジの進む向きが電流の向きになる」というアンペアの右ネジの法則にまとめました(本誌2004年2月号，pp.119-124の連載第1回を参照)．これによれば，ループ状の線路に流れる電流と周囲にできる磁界は，**図8**のようになるはずです．

当時の電源は，主にボルタ注4が考案した電池ですから直流です．電磁界シミュレーションによって，13.56MHzにおけるある瞬間の磁界を表示すると，**図9**のようになっていることがわかります．これはMicro-Stripes注5でシミュレーションした同じ寸法の微小ループです．線路はワイヤ・モデルを使っています．磁界は右側で右巻，左側で左巻きになっており，このときループには左回りの電流が流れていると考えられます．

**図9**を詳しく観察してみると，磁界の強い領域はループの近傍に限られているようです．垂直方向へは磁力線が束のようになって，文字どおりの磁束注6ができているようすがわかります．また，磁界はやはりループの直径程度の距離から先の領域では弱くなっています．

## ● ファラデーの電磁誘導の法則

ファラデー注7は「電流から磁気が作れる(エルステッドやアンペア)」のであれば，逆に「磁気から電流が作れるのではないか」と考えました．**図10(a)**に示すような磁束$\Phi$が増加すると$E$の向きに起電力が生じ，この起電力によって電流が流れたとすると，磁束$\Phi'$ができることになりま

注2：エルステッド(1777年～1851年)は，デンマークの物理学者，化学者．1819年に電流の近くに磁界が発生し，磁針が一定の方向をとることを発見．エルステッドは磁界の強さの単位名Oe(エルステッド)としても使われている．
注3：アンペア(アンペール，1775年～1836年)は，フランスの物理学者．エルステッドについで電流間の相互作用を発見．電流の単位A(アンペア)は彼の名にちなんでいる．
注4：ボルタ(1745年～1827年)は，イタリアの物理学者．検電器(1781年)，蓄電器(1782年)，ボルタの電池(1799年)などを発明した．電圧の単位V(ボルト)は彼の名にちなんでいる．
注5：Micro-Stripes(マイクロストライプス)のWebページのURLは「http://www.microstripes.com/」．
注6：磁束とは，磁化された物体や空間に仮想された曲線の集まり．
注7：ファラデー(1791年～1867年)は，イギリスの物理学者，化学者．電磁誘導の発見(1831年)，電気分解のファラデーの法則(1833年)，自己誘導の発見(1834年)など．静電容量(キャパシタンス)の単位F(ファラッド)は，彼の名にちなんでいる．

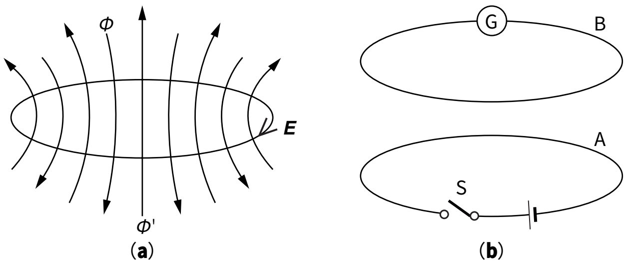



**図10　ファラデーの電磁誘導の法則**

(a)のように，磁束$\Phi$が増加すると$E$の向きに起電力が生じる．この起電力によって電流が流れたとすると，磁束$\Phi$'ができる．(b)は，ファラデーの電磁誘導の実験．

す(本誌2004年10月号，pp.142-149の連載第6回を参照)．

**図10(b)**はファラデーの電磁誘導の実験を簡略化したものです．この回路でスイッチSを閉じてAに電流を流すと，その瞬間検流計Gが振れます．しかし，しばらくするとGの振れはなくなります．次にSを開いた瞬間Gが振れますが，Sを閉じるときと開くときとで電流の向きは反対である，ということがわかりました．ここで重要なことは，微小時間にコイルAの磁束が変化することにより，もう一方のコイルBにエネルギーが伝わるという発見です．

マクスウェルの方程式(本誌2004年5月号，pp.131-138の連載第3回を参照)では，ファラデーの法則を次式で表現しています．

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \qquad (1)$$

ここで右辺の$\partial \boldsymbol{B}/\partial t$は，微小時間における磁束密度Bの変化量を表します．$\partial t$はある時刻$t_1$から$t_2$までの微小時間の増分と考えられます．マイナスの符号があるので，$\partial \boldsymbol{B}$は減少を表しています．これを文章で表すと「一つの回路に電磁誘導によって生じる起電力は，この回路に鎖交する磁束数の減少する割合に比例する」となります．また左辺の$\nabla \times \boldsymbol{E}$(または$rot\,\boldsymbol{E}$)は，電界ベクトル場$\boldsymbol{E}$の「回転」と呼ばれるとおり，この値がゼロでなければ回転のある渦のような流れを表します．つまり，**図10(a)**のループに沿った$\boldsymbol{E}$を表現していることがわかります．

## 2. コイルのインダクタンス

### ● 自己インダクタンスとは

コイルの導線に電流を流すと，その周辺の空間には磁束が発生すると考えられます．この導線に交差する磁束の数(鎖交数)を$\Phi$で表しますが，電流$I$との間に次式の関係があります．

$$\Phi = LI \qquad (2)$$

ここで比例定数$L$を，このコイルの自己インダクタンスといいます．また，式(2)を変形すると，

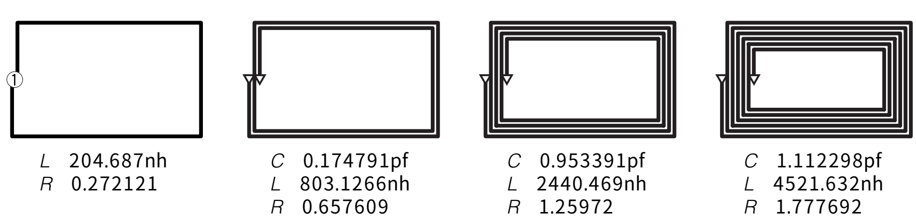
$$L = \Phi / I \qquad (3)$$

が得られますから，自己インダクタンスは「一つの回路に単位電流が流れたとき，それが作る磁束と電流の鎖交数である」と定義できます．磁束をWb(ウェーバ)，電流をA(アンペア)で測れば，インダクタンスの単位はWb/Aですが，これをH(ヘンリー)といいます[注8]．

**図11**は，コイルの巻数を増やしたSonnet Liteのモデルです．Spiceサブサーキットを生成する機能を使って，それぞれのコイルの自己インダクタンス$L$を求めています．複数巻きコイルのポートは，巻き始めと巻き終わりの端にedge via(図中の小さい▽マーク)を付け，次の層に短い線路を設けて内部ポートを形成します．1回巻きのSpice等価回路は$L$と$R$だけですが，複数巻きになると，線間に電界が生じることで，わずかな容量$C$が現れます．また，線材を銅に設定したため，巻数に応じて$R$の値も変化しています．

**図11**
**コイルの巻数を増やしたSonnet LiteのSpiceサブサーキット**

Spiceサブサーキットを生成する機能を使って，それぞれのコイルの自己インダクタンス$L$を求める．




(a) 1回巻き　(b) 2回巻き　(c) 4回巻き　(d) 6回巻き

注8：インダクタンスの単位H(ヘンリー)は，ファラデーとは別個に電磁誘導の法則を発見したアメリカの物理学者Joseph Henry(1797年～1878年)にちなんでいる．

### ● 相互インダクタンスとは

13.56MHzのRFIDは，リーダ/ライタ側のアンテナ（コイル）とタグ側のアンテナ（コイル）が磁気エネルギーを介して通信するシステムといえます．タグが複数になると，それぞれのコイルに流れる電流は$I_1$，$I_2$，$I_3$，…となり，鎖交数も次のように考えられます．まず$I_1$と鎖交する磁束は，

$$
\begin{aligned}
&I_1\text{による磁束と}I_1\text{との鎖交数}=L_1 I_1\\
&I_2\text{による磁束と}I_1\text{との鎖交数}=M_{12} I_2\\
&I_3\text{による磁束と}I_1\text{との鎖交数}=M_{13} I_3\\
&\cdots
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

です．同様に$I_2$と鎖交する磁束は，

$$
\begin{aligned}
&I_2\text{による磁束と}I_2\text{との鎖交数}=L_2 I_2\\
&I_1\text{による磁束と}I_2\text{との鎖交数}=M_{21} I_1\\
&I_3\text{による磁束と}I_2\text{との鎖交数}=M_{23} I_3\\
&\cdots
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

です，$I_3$，$I_4$，…と鎖交する磁束も同様に考えられます．

ここで$L_1$，$L_2$，$M_{12}$，…などの係数は，磁束の数（鎖交数）と電流の比ですから，コイルの形状と空間の媒質が変わらなければ定まる定数です．例えば$M_{12}$は，$I_1$の回路と$I_2$の回路の相互インダクタンスといいます．ですから，「二つの回路の間の相互インダクタンスは，両回路に単位電流が流れたとき，第1の回路の作る磁束とほかの回路の電流との鎖交数である」と定義できます．

**Column 電流の持つ磁気的エネルギー**

電流が流れて磁界ができている場合，空間の全エネルギーは電流が流れたためにできる磁界のエネルギーと考えられます．このエネルギーを$W$とすれば，

$$w=\int\frac{H\cdot B}{2}dv$$

で求められます．微小磁束$\Delta\Phi$によってできる領域は，断面$\Delta S$の閉じた管になりますが，管に沿った微小長さ$ds$を用いると，$H\cdot Bdv$は$H\cdot(B\Delta Sds)$と書けます．ここで，$B\Delta S=\Delta\Phi$なので，この微小部分のエネルギーは，

$$\Delta w=\frac{\Delta\Phi}{2}\int H\cdot ds=\frac{\Delta\Phi}{2}\sum I$$

となります（$\int H\cdot ds$は$\Delta\Phi$に鎖交する電流に等しい）(4)．

### ● 二つのコイルの結合度

今，タグ側のコイルが一つ，リーダ側のコイルが一つの場合を考えます（**図12**）．それぞれの自己インダクタンスを$L_1$，$L_2$，相互インダクタンスを$M_{12}$とすれば，これらのコイルに電流$I_1$，$I_2$が流れたとき，電流の持つ磁気的エネルギー$W$は次式で表すことができます（下掲のコラム「電流の持つ磁気的エネルギー」を参照）．

$$w=\frac{1}{2}\Sigma\,(\text{電流})\times(\text{電流と鎖交する磁束}) \qquad (6)$$

式(4)，式(5)，式(6)から，

$$
\begin{aligned}
w&=\frac{1}{2}\left(L_1I_1{}^2+L_2I_2{}^2+2M_{12}I_1I_2\right)\\
&=\frac{1}{2}\left\{L_1\left(I_1+\frac{M_{12}}{L_1}I_2\right)^2+\left(L_2-\frac{M_{12}{}^2}{L_1}\right)I_2{}^2\right\}
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

式(7)は負にはならないので，

$$L_1\geqq 0$$

$$L_2-\frac{M_{12}{}^2}{L_1}\geqq 0$$

が成り立ち，

$$L_1L_2-M_{12}{}^2\geqq 0 \qquad (8)$$

が導かれます．$L_1L_2\geqq 0$ですから，自己インダクタンス$L_1$，$L_2$はつねに正になります．また，式(8)から相互インダクタンス$M_{12}$は負もあり得ますが，$L_1$，$L_2$の大きさによってその値は制約されることがわかります．

**図12**では$I_2$の作る磁束が$I_1$と正に鎖交注9しているので，

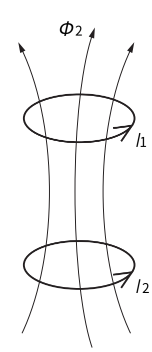



**図12**
**二つのコイルと相互インダクタンス**
タグ側にコイルが一つ，リーダ側にコイルが一つある．

注9：二つの閉曲線が1回絡まり合って（鎖交して）おり，右ねじの回転方向と進行方向の関係になっている場合を，「正に鎖交する」という．

$M_{12}$は正の値です．もし$I_2$の向きが逆であれば，$M_{12}$は負になります．つまり両コイルの磁束が加わる向きの場合に相互インダクタンスが正で，相反する向きの場合に負になります．

もし式(8)の左辺がゼロであれば，式(7)から，

$$I_1 + \frac{M_{12}}{L_1} I_2 = 0$$

になるようにすれば，$W$がゼロになることもあり得ます．その物理的な意味は，空間のあらゆる場所に磁界が存在しないということになりますが，実際には磁界ができているわけですから，これは$I_1$の作る磁界が$I_2$の作る磁界と同じで符号が反対であると考えられます．

$I_1$の作る磁束はすべて$I_1$と鎖交し，また$I_2$の作る磁束はすべて$I_2$と鎖交します．そのとき両電流が作る磁界がまったく同じ分布なので，結局，$I_1$の作る磁束はすべて$I_2$と鎖交し，$I_2$の作る磁束もすべて$I_1$と鎖交することになります．つまり，これは完全に漏れ磁束のない状態であると考えられます．

コイルの作る磁束が他方のコイルに鎖交しないものが漏れ磁束と呼ばれます．これがある場合は，$L_1 L_2 \geqq M_{12}{}^2$になります．ここで$M_{12}{}^2$が小さいほど漏れ磁束が多いので，次の式で定義される$k$を，二つのコイルの結合係数といいます．

$$k^2 = \frac{M_{12}{}^2}{L_1 L_2} \tag{9}$$

結合係数$k$が1のときは漏れ磁束がなく，1に近いときを結合が密であるともいいます．

### ● リーダとタグの評価

タグ側コイルとリーダ側コイルの自己インダクタンスと，両コイルの相互インダクタンスがわかれば，結合係数で通信の状態を評価できそうです．

まず，コイルの自己インダクタンスを求めます．円形ループで，ワイヤの直径$d$がループの直径$D$と比べて小さい場合，次の簡単な近似式が使えます(5)．

$$L = N^2 \mu_0 R \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \tag{10}$$

ここで$R$はループの半径，$d/D < 0.0001$

一方，**図2**のような長方形コイルの自己インダクタンスを求める式はやや複雑です（下掲のコラム「長方形コイルの自己インダクタンス」を参照）．

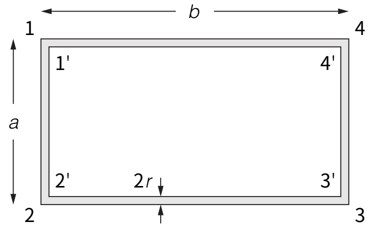
## Column 長方形コイルの自己インダクタンス

**図B-1**のような長方形のコイル（ただし$r \ll a$，$b$）の$L$は，導体の中心線に電流が集中していると仮定し，これと内縁（四辺1'－2'－3'－4'）との間の$M$を求めることで得られます．これは中心部の電流による磁束とループの鎖交を計算しているので，ループの鎖交磁束，すなわち$L$にほかならないという考えです．

まず，間隔が$d$で長さ$l$の2線間の$M$は，

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{\sqrt{l^2+d^2}+l}{d} - \sqrt{1+\left(\frac{d}{l}\right)^2} + \frac{d}{l}\right) \ [\mathrm{H}] \tag{B-1}$$

また，$l \gg d$のときは，




**図B-1　長方形のコイルの自己インダクタンスを求める**

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{d} - 1\right) \ [\mathrm{H}] \tag{B-2}$$

で求められます(4)．

辺1－2と辺1'－2'の間の$M$，および辺3－4と辺3'－4'間の$M$は，

$$M_{12,1'2'} = M_{34,3'4'} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(a\ln\frac{2a}{r} - a\right) \tag{B-3}$$

同様に辺1－4と辺1'－4'の間，および辺2－3と辺2'－3'の間で，

$$M_{14,1'4'} = M_{23,2'3'} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(b\ln\frac{2b}{r} - b\right) \tag{B-4}$$

また辺1－2，辺3'－4'の間，および辺3－4と辺1'－2'間は電流が逆向きで，

$$M_{12,3'4'} = M_{34,1'2'} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(-a\ln\frac{\sqrt{a^2+b^2}+a}{b} + \sqrt{a^2+b^2} - b\right) \tag{B-5}$$

$$M_{14,2'3'} = M_{23,1'4'} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(-b\ln\frac{\sqrt{a^2+b^2}+b}{a} + \sqrt{a^2+b^2} - a\right) \tag{B-6}$$

$$L=\frac{\mu_0}{\pi}\left\{-a\ln\left(\sqrt{a^2+b^2}+a\right)-b\ln\left(\sqrt{a^2+b^2}+b\right)\right.$$
$$\left.+(a+b)\ln\frac{2ab}{r}+2\sqrt{a^2+b^2}-2(a+b)\right\} \quad (11)$$

次に両コイルの相互インダクタンスですが，これも結果を示すと次の式になります（手順は下掲のコラムを参照）．

$$M=\frac{\mu_0}{\pi}\left\{a\ln\frac{\left(a+\sqrt{a^2+d^2}\right)\sqrt{b^2+d^2}}{d\left(a+\sqrt{a^2+b^2+d^2}\right)}\right.$$
$$+b\ln\frac{\left(b+\sqrt{b^2+d^2}\right)\sqrt{a^2+d^2}}{d\left(b+\sqrt{a^2+b^2+d^2}\right)} \quad (12)$$
$$-2\sqrt{a^2+d^2}-2\sqrt{b^2+d^2}$$
$$\left.+2\sqrt{a^2+b^2+d^2}+2d\right\}$$

両コイルが同寸の場合の結合係数$k$は，式(9)から，

$$k=\sqrt{\frac{{M_{12}}^2}{L_1L_2}}=\frac{|M|}{L} \quad (13)$$

で得られます．

例えば**図2**のコイルの$L$は，式(11)から140nH（ナノヘンリー），また両コイルの間隔が10mmのときの$M$は46nHになり，このときの結合係数$k$は0.3でした（ここで$a$＝40mm，$b$＝70mm，$r$＝1mmとした）．

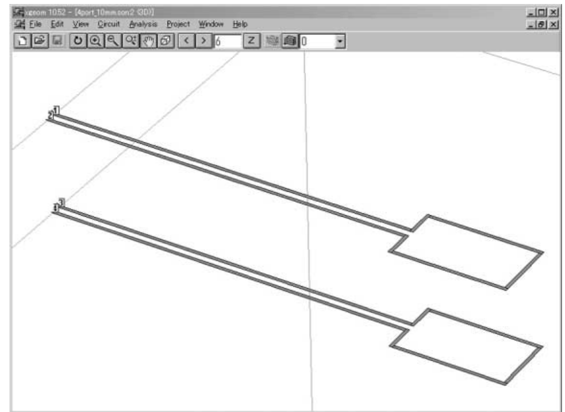


**図13　二つのコイルを10mm離したSonnetのモデル**
線路部分のメタルが増えたので，Boxを512mm×512mmにした．

## ● Sonnet Liteを利用したリーダとタグの評価

より現実的なRFIDシステムのシミュレーションは次回に譲り，コイルの$L$と二つのコイルの結合係数$k$をSonnet Liteで解く方法について述べます．

**図13**は二つのコイルを10mm離したモデルです．**図2**と同じ寸法ですが，金属のタイプはlossless（無損失）に設定

---

$$L=2\left(M_{12,\,1'2'}+M_{14,\,1'4'}+M_{12,3'4'}+M_{14,2'3'}\right)=\text{本文の式(11)}$$

次に，二つの長方形コイルの相互インダクタンスを考えます．

**図B-2**で辺ABは辺EFと辺HGに対しては相互インダクタンスを持ちますが，辺EHと辺FGに対しては持たないことから，

$$M=M_{AB,EF}+M_{AB,GH}+M_{BC,FG}+M_{BC,HE}$$
$$+M_{CD,GH}+M_{CD,EF}+M_{DA,HE}+M_{DA,FG}$$

ここで，

$$M_{AB,EF}=M_{CD,GH}=M_{AB,GH}=M_{CD,EF}$$

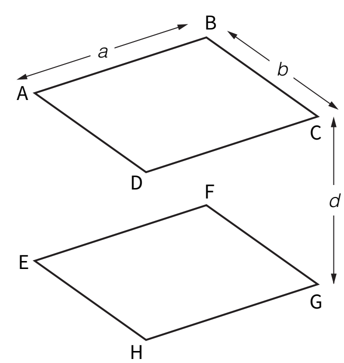
などから，

$$M=2\left(M_{AB,EF}+M_{AB,GH}+M_{BC,FG}+M_{BC,HE}\right) \quad \text{(B-7)}$$

$M_{AB,\,EF}$は，式(B-1)から，

$$M_{AB,EF}=\frac{\mu_0 a}{2\pi}\left(\ln\frac{\sqrt{a^2+d^2}+a}{d}-\sqrt{1+\left(\frac{d}{a}\right)^2}+\frac{d}{a}\right) \quad \text{(B-8)}$$

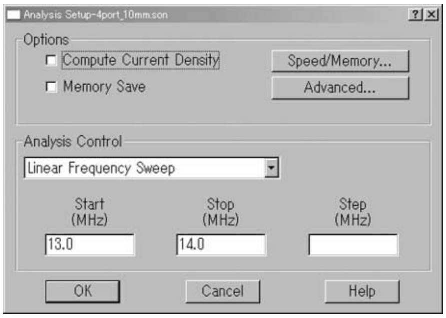
$M_{AB,\,GH}$は向きが逆なので，




**図B-2**
**二つのコイルの相互インダクタンスを求める**

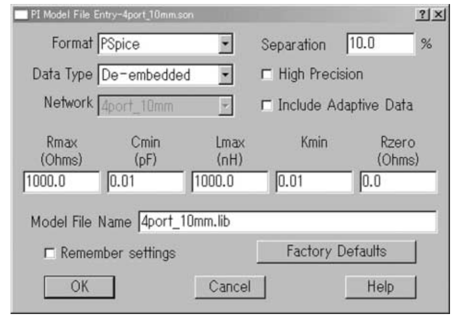
$$M_{AB,GH}=-\frac{\mu_0 a}{2\pi}\left(\ln\frac{\sqrt{a^2+b^b+d^2}+a}{\sqrt{b^2+d^2}}-\sqrt{1+\frac{b^2+d^2}{a^2}}+\frac{\sqrt{b^2+d^2}}{a}\right) \quad \text{(B-9)}$$

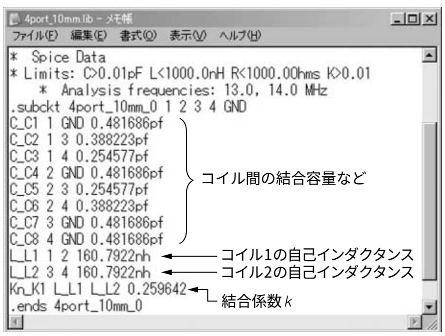
ほかの辺も同様で，これらを式(B-7)に代入して，本文の式(12)が得られます．




◀ **図14**
**Linear Frequency Sweep**
13MHzと14MHzの二つの周波数を指定．

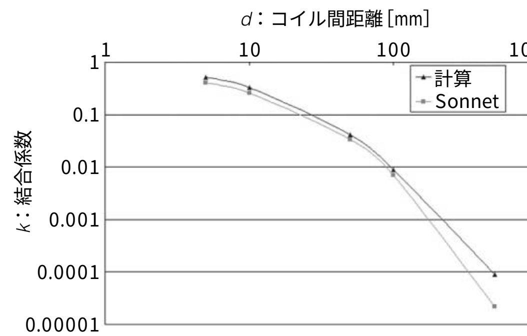
▶ **図15**
**Linear Frequency Sweepの設定**
Lmaxの値を1000に変更して[OK]ボタンを押す．




◀ **図16**
**PSpiceフォーマットのサブサーキット**
コイルを10mm離したモデル．

▶ **図17**
**計算結果とSonnetの結果の比較**
両者は近い値を示している．




しています．**図2**のコイルを二つ使うと，SPICEモデルを出力するために必要なコモン・グラウンドがとれないので，ここではBoxwallポートを使います．また，給電線路の影響を除くためには，参照面(reference plane)をコイルの左端に設定します．

13.56MHzにおける等価回路を得るためには，**図14**のようにLinear Frequency Sweepで，13MHzと14MHzの二つの周波数の結果を得ます．「Analysis」→「Output Files...」を選択して表示されるダイアログで，右上の[PI Model...]ボタンを押し，中ほどの「Lmax」の値を1000に変更して[OK]ボタンを押します(**図15**)．

「Project」→「Analyze」でシミュレーションすると，libという拡張子の付いたテキスト・ファイルが出力されます．**図16**はPSpiceフォーマットのサブサーキットです．コイルを10mm離したモデルで，$L$は160nH，結合係数$k$は0.26でした．Sonnetのモデルは幅2mmの線路なので，細いワイヤを前提にした前項の式とそのままでは比較できませんが，両者は近い値が得られました(**図17**)．

## まとめ

13.56MHz用RFIDの通信は，リーダとタグの両コイルの磁気的な結合量で評価できることがわかりました．コイル間の距離がコイルの直径寸法を超えるあたりから，結合係数が急に小さくなることから，通信可能なエリアは両コイルの近傍に限られることがわかります．次回は，より現実的な複数巻きのコイルについて学びます．


**参考・引用*文献**

(1) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界，CQ出版社，2003年(第6版)．
(2) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2003年(第2版)．
(3) 小暮裕明；周波数領域の解析手法を高速化する──SonnetのABS(Adaptive Band Synthesis)，Design Wave Magazine，pp.148-154，2002年6月号．
(4) 山田直平ほか；電気磁気学，電気学会，学献社，1973年(第18版)．
(5) Klaus Finkenzeller，ソフト工学研究所訳；RFIDハンドブック，日刊工業新聞社，2001年(初版)．



**こぐれ・ひろあき**
**小暮技術士事務所・技術士(情報工学部門)**
**http://www.kcejp.com/**